

加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响的试验研究

陈 勉¹, 张 艳¹, 金 衍¹, 李良川²

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油天然气股份有限公司 冀东油田分公司钻采院, 河北 唐山 063000)

摘要: 当加载速率较快时, 砂岩、粗砂岩、泥岩等岩石相对于加载速度较慢的测试, Kaiser 点对应的应力值增大, 但对于灰岩等脆性岩石, 加载速率对其 Kaiser 效应影响甚微。因此, 需要具体分析加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应的影响。试验发现, 不同加载速率导致声发射累积次数随应力的变化曲线存在显著差异。这是因为当加载速率较慢时, 岩心内部较大和较小的裂缝都会发生错动和扩展, 致使声发射信号比较明显, 得到的 Kaiser 点对应的应力值较小; 而当加载速率较快时, 只有较大的裂缝才会发生错动和扩展, Kaiser 点对应的应力值相对较大。当深度大于 2 500 m 的岩心在声发射测量过程中, Kaiser 点往往出现在岩石破坏点之后, 因此必须模拟地层条件采用围压下的 Kaiser 效应进行测量, 测得相应地层的地应力大小。针对不同的岩性岩石选取不同的加载速率进行加载研究, 试验结果与现场试验结果基本一致。结论为 Kaiser 效应试验测地应力提供理论依据和借鉴。

关键词: 岩石力学; Kaiser 效应; 地应力; 岩性; 加载速率; 声发射

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2599 - 06

EXPERIMENTAL STUDY OF INFLUENCE OF LOADING RATE ON KAISER EFFECT OF DIFFERENT LITHOLOGICAL ROCKS

CHEN Mian¹, ZHANG Yan¹, JIN Yan¹, LI Liangchuan²

(1. Key Laboratory of Petroleum Engineering of Education Ministry of Education Ministry, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Well Drilling and Production Research Institute of Jidong Oil Field Company, Petro China Company Limited Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract: Different loading rates on rock samples may lead to considerable differences among the cumulative AE hit-stress curves. Kaiser stress values of sandstone, gritstone and mudstone increase with relatively faster loading rate, while for brittle rock-like limestone, loading rate has hardly any influence on Kaiser effect. Hence, a more in-depth analysis of the influence of loading rate on Kaiser effect of different lithological rock is very necessary. On one hand, all cracks in rock samples, regardless of their sizes, slip and propagate when loading rate is relatively smaller, which leads to a clearer acoustic emission signal. As a result, a smaller stress value is achieved. On the other hand, only larger cracks slip and propagate when loading rate is speeding up, which results in larger stress value. As for different lithological rocks, distinct loading rates are needed during the tests. In addition, the research

收稿日期: 2007 - 09 - 14; **修回日期:** 2007 - 12 - 08

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目“复杂油气田地质与提高采收率技术”资助(2008ZX05009 - 006)

作者简介: 陈 勉(1962 -), 男, 1991 年毕业于中国矿业大学矿山工程力学专业, 博士生导师, 主要从事石油工程岩石力学方面的研究工作。E-mail: chenmian@vip.sina.com

shows that Kaiser effect point of the core below 2 500 m appears after its collapse point, which demonstrates that the measurement of Kaiser effect under confining pressure is needed in order to simulate formation situation to achieve corresponding stress value. The results of the test are applied to oilfield tests. The experimental results in laboratory test are in largely accordance with those in oilfield. It provides theoretical basis and reference for testing in-situ stress by Kaiser effect laboratory tests.

Key words: rock mechanics; Kaiser effect; in-situ stress; lithology; loading rate; acoustic emission(AE)

1 引言

岩石的 Kaiser 效应是指各向异性固体的应力、应变等的记忆能力^[1], 例如形变记忆效应、应变硬化(形变率分析应力测量技术)、超声波记忆效应、带电记忆效应等。1963年, R. E. Goodman 第一次发现岩石的 Kaiser 效应^[2], 他认为岩石对经历的最大应力或应变具有记忆。根据 Kaiser 效应的性质, T. Kanagawa 和 H. Nakasa^[3]在 1978 年首先利用 Kaiser 效应来测量地应力。他们通过对不同地层的岩石做声发射试验来测得地应力^[4, 5]。随着人们对 Kaiser 效应测量地应力的深入研究, K. Kurita 和 N. Fujii^[2]在 1979 年发现了含水饱和度和时间效应对 Kaiser 效应的影响: 随着时间的推移, 一些岩性的 Kaiser 效应逐渐消失^[6, 7]。之后国内外学者对岩石的 Kaiser 效应做了大量研究, 探索得到另外几个因素如时间^[8]、温度、岩性^[9]、围压^[10]、多级加载中主应力轴方向发生变化^[11]等均对 Kaiser 效应测量结果产生影响。1989年, K. Michihiro 等^[12]在室内试验中发现了不同岩性岩石加载时间对 Kaiser 效应的影响。Y. Li 和 D. R. Schmitte^[13]在 1997 年发现取芯过程对 Kaiser 效应的影响。A. Lavrov^[11]在 2002 年发现脆性岩石在多级加载过程中加载速率对 Kaiser 效应有影响。但是在实际应用中, 油田地应力的测量主要是针对地层中的具有各种复杂力学性质的岩石^[14~17], 不同的加载速率对地应力的测量是否会产生影响迄今为止仍是一个亟待解决的问题。

笔者在对冀东油田地层岩石利用 Kaiser 效应测量地应力的试验中发现: 对于不同的岩性(如砂岩、泥岩、灰岩等)岩石, 加载速率对 Kaiser 效应测得应力值存在显著影响, 不同的岩性, 力学性质不同, 裂缝存在形式不一样, 如果使用相同速率来加载, 有些岩性可能得不到真实的地应力值, 这将会影响

地应力的现场应用。本文针对加载速率对 Kaiser 效应的影响做了定量研究, 通过评价不同的加载速率对不同岩性的 Kaiser 效应试验影响效果, 得到 Kaiser 效应测量地应力的真实值。

试验中考虑到深层岩石的 Kaiser 效应的不明显性, 利用加围压的方式来模拟地层状况进行加载。

2 室内围压加载声发射试验

2.1 试验仪器和材料

试验仪器是由 MTS816 岩石测试系统和美国 SAMOSTM 声发射检测系统组成(见图 1)。MTS816 岩石测试系统是全数字计算机自动控制系统, 可实时记录荷载、应力、位移和应变值, 并同步绘制荷载-位移、应力-应变曲线。SAMOSTM 声发射检测系统是美国 PAC 公司研制的第三代全数字化系统, 其核心是并行处理 PCI 总线的 PCI-8 声发射功能卡, 在一块板上具有 8 个通道的实时声发射特征提取、波形采集及处理的能力, 它采用现代数字信号处理技术(digital signal processor, 简称 DSP), 是目前国际上先进的声发射处理系统。

试验材料是取自冀东油田不同层位的岩心, 采用圆柱体试件。为避免各向异性的影响, 所用岩心均取自垂直方向的同一块岩心, 直径和轴线长度的比值为 1:2, 直径一般为 25 mm, 其平行度和垂直度都符合试验规程。在试件两端面与垫块之间垫有薄片及定向块, 用以减少端面摩擦和保证试件承受轴向均布载荷。试件加压两端及与声发射传感器接触处均经过磨光, 以消除初始加载时产生的干扰信号, 并使声发射传感器更加有效的接收试件内部裂纹产生时发出的 AE 信号。为保证传感器与试件的耦合效果, 在二者接触部位涂耦合剂, 再用橡胶管把传感器固定在试样侧面, 同时用示波器显示波形信号。

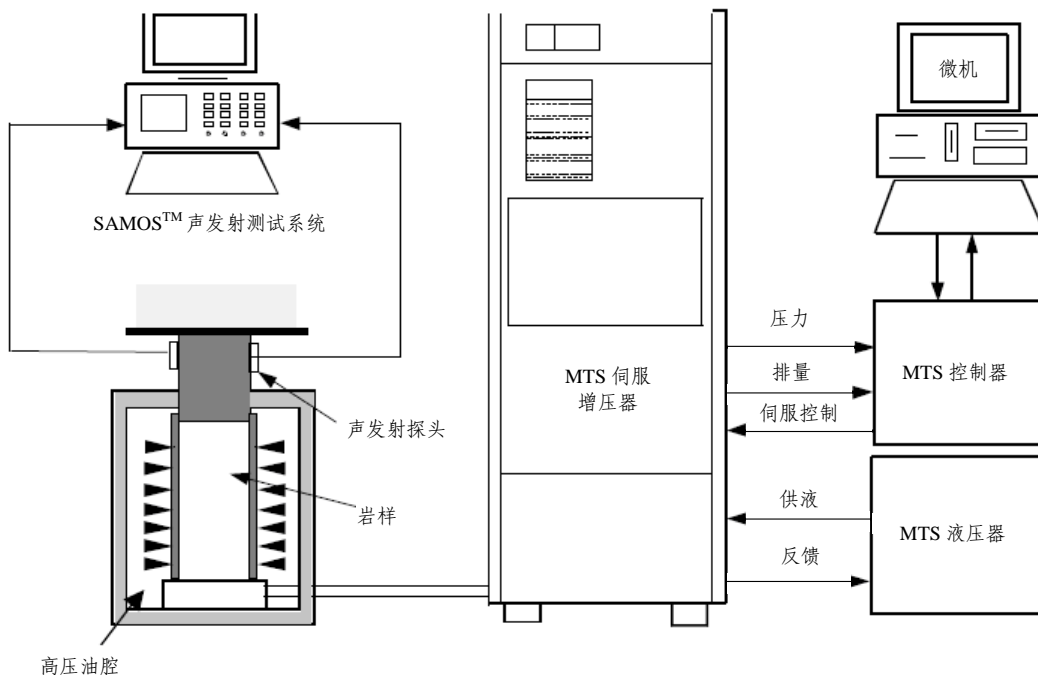


图 1 围压下声发射法测地应力流程图

Fig.1 Flowchart of in-situ stress measurement by acoustic emission under confining pressures

2.2 试验方法

根据岩样所处的地层计算出围压的大小, 然后在室内模拟地层情况^[10]。MTS 电液伺服控制加载系统针对垂直方向所取不同岩性的岩心, 以轴向不同的加载速率进行加载。在轴向加载的过程中, 同时均匀增加围压值。等围压升至某一预定值后, 保持围压值不变, 继续增加轴向载荷。声发射探头用于探测岩样受载过程中产生的声发射信号, 其感应频率为 40~100 kHz。声发射信号经放大后被送至 SAMOS™ 声发射仪进行记录和处理, 声发射仪可以给出声发射数、声发射能量及其变化率随载荷的变化曲线。

2.3 试验结果及分析

通过对不同的岩心以 0.01, 0.02, 0.04, 0.05 MPa/s 的速率进行加载得到声发射全过程试验结果(见图 2~4)。根据声发射累积次数随时间的变化曲线, 得到每组试验与 Kaiser 效应相对应的应力值。试验数据见表 1。

通过试验得图 2~4, 可以看出在不同的加载速率下, 声发射基本可以分为 4 个阶段^[18]: (1) 初始, 即微裂隙压密阶段, 反映出岩石试件受载后, 内部已存裂隙受压闭合。(2) 剧烈区。随着荷载增加, 进入弹性变形阶段, 既无塑性变形, 也无裂纹扩展。

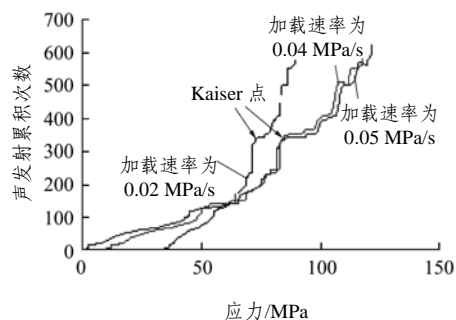


图 2 围压下砂砾岩声发射累积次数与 Kaiser 效应相对应的应力关系

Fig.2 Relationship between stresses corresponding to Kaiser effect and acoustic counts of the glutenite under confining pressures

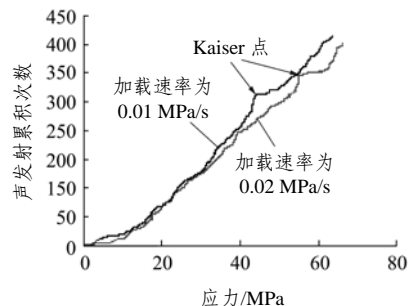


图 3 围压下粗砂岩声发射累积次数与 Kaiser 效应相对应的应力关系

Fig.3 Relationship between the stresses corresponding to Kaiser effect and acoustic counts of the sandstone grit under confining pressures

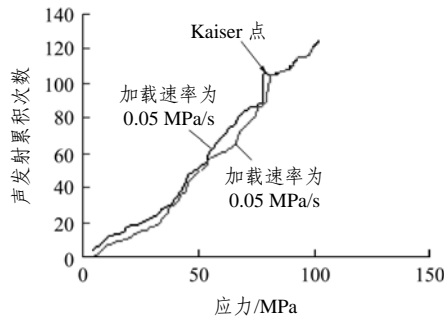


图 4 围压下灰岩声发射数与 Kaiser 效应相对应的应力关系

Fig.4 Relationship between the stresses corresponding to Kaiser effect and acoustic counts of the limestone under confining pressures

表 1 地应力测量结果及对比关系

Table 1 Measurement results and correlation of in-situ stresses

井号	岩性	深度/m	应力真实值* /MPa	加载速率 /(MPa · s ⁻¹)
				0.02
G60 - 23	砂砾岩	3 806	82.35	0.04
				0.05
NP1 - 4	灰岩	3 792	80.52	0.04
				0.05
190 - 4	中砂岩(含泥)	2 962	63.02	0.02
				0.04
G32 - 30	细砂泥岩	3 515	75.21	0.05
				0.04
G60 - 23	砂泥岩	3 883	84.12	0.05
				0.01
M29 - 1	粗砂岩	2 479	49.96	0.02

井号	Kaiser 效应对应的应力/MPa	弹性模量 /MPa	偏差/%
	72.59	14 402	11.85
G60 - 23	80.2	14 497	2.61
	84.91	15 012	-3.11
NP1 - 4	80.91	12 560	0.48
	80.99	12 596	0.58
190 - 4	60.92	35 264	-3.33
	68.48	42 314	8.66
G32 - 30	70.12	17 563	-6.77
	76.25	19 654	1.38
G60 - 23	78.02	14 456	-7.25
	86.93	15 329	3.34
M29 - 1	49.56	8 956	-0.80
	55.26	9 562	10.61

注: *应力真实值表示由水力压裂和测井数据综合比较得到。

试件中原有裂隙继续被压密, 声发射活动较少, 甚至没有。(3) 下降区。继续加载, 进入裂纹的稳定扩展和扩容阶段, 裂隙呈稳定状态发展, 受施加应力控制。产生的声发射信号多为突发型, 并有逐渐增加的趋势, 主要原因是由于大量的微裂纹开始形核、成核、汇合, 最后微裂纹稳定扩展所产生。(4) 沉静区。继续加载, 进入裂纹的非稳定扩展至破坏阶段, 试件内斜交或平行加载方向的裂隙扩展迅速, 裂隙进入不稳定发展阶段, 声发射活动急剧增多。裂隙扩展接交形成滑动面, 最终导致岩石试件完全破坏。

Kaiser 效应的力学本质是岩石受原地应力作用所形成特定的微裂纹在达到原地应力的载荷作用下重新活动和延展的反映。当微裂纹在外载作用下生成和扩展时, 发射出较强的声信号。根据这些声信号, 判断微裂纹是否生成或扩展^[19]。从表 1 中可以看出, 不同的加载速率下, 所测相同岩心对应的应力值不同。对不同的加载速率, 砂泥岩测得的弹性模量值差别很大。本文利用密度测井计算与水力压裂测量的综合评价所得到的地应力真实值, 与试验测得的地应力值进行了比较, 并得到应力偏差。

图 2 为砂砾岩在 3 种不同的加载速率下的声发射累积曲线图, 根据表 1 应力值看出, 随着加载速率的增大, Kaiser 点对应的应力值是增加的。0.02 MPa/s 对应的曲线与 0.04 MPa/s 对应的曲线斜率变化较大, 说明加载速率对砂砾岩 Kaiser 效应的影响很大。

图 3 为粗砂岩在 2 种不同的加载速率下的声发射累积曲线图, 该试件取自冀东油田约 2 000 m 处地层岩心, 由于粗砂岩强度较低, 采用较小的加载速率进行试验, 在试验所得的不同的加载速率下, 曲线斜率发生很大变化, 对应的地应力值随着加载速率的增加而增大。随着加载速率的增大, 岩石在很短的时间内就发生了破坏。

如图 4 所示是灰岩的在 2 种不同的加载速率下的声发射累积曲线图, 对于灰岩, 2 条曲线斜率不同, 但是对应的应力值却基本相同, 这说明加载速率对脆性岩石的 Kaiser 效应影响程度并不大。

对于砂、泥岩来说, 不同的加载速率下所得的 Kaiser 点值相差很大。这是由于加载速率较慢时, 较大和较小的裂缝都会发生错动和闭合, 导致声发射产生的 Kaiser 效应对应的值较小; 对于加载速率

较快时, 只有大的裂缝会延伸产生错动和闭合, 产生 Kaiser 效应对应的应力值较大, 而且此时对于强度较小的岩石, 加载速率较快, 岩石也容易破坏。

利用弹性模量的测量来定量分析说明上述观点。取如上试验同样的岩心, 在不同的加载速率下测量岩心的弹性模量, 试验数据见表 1。随着加载速率的增大, 岩石的弹性模量是增加的, 且抗压强度较低的岩心弹性模量较小, 与加载速率对应力值的影响规律基本吻合。

3 讨论与应用

通过上面的试验可以看出, 灰岩通过 Kaiser 效应测量得到的应力值与不同的速度加载没关系, 而对于砂砾岩、砂泥岩、细砂泥岩, 由于岩石本身就比较致密, 在深度超过 2 500 m 的同时, 根据表 1 数据对比得到, 采用 0.04 MPa/s 的速率比较合适, 也就是说采用较大速率加载得到的应力值精度高。然而, 对于粗砂岩、中砂岩这些较疏松岩石, 其强度本身就较小, 在加载的过程中, 若速率过快则得到的 Kaiser 点值偏差比较大(偏差约 12%), 应选取较小的速率进行加载。

将该试验结论用于冀东油田的多口井的地应力测量。下面以四口井的地应力测量为例进行说明。已知参数和测量结果见表 2, 按照石油工业的惯例, 一般以应力梯度表示主地应力的大小, 单位为 MPa/(100 m)。

为了验证试验结果的准确性, 与现场进行的微型水力压裂试验的结果进行了比较, 现场进行的微型水力压裂试验数据见表 2。通过数据比较可以看出, 水力压裂法得到的地应力与 Kaiser 效应试验测量结果基本一致, 说明在加载围压下的 Kaiser 效应

测量中, 不同的加载速率对测量值会产生影响, 必须准确评价合理的速率, 才能得到真实值。

4 结论与建议

本文通过对冀东油田不同层位的垂直岩心的声发射测量地应力试验, 进行了加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响研究。针对不同的岩性, 利用不同的加载速率得到如下结论:

(1) 不同的加载速率对脆性岩石, 如灰岩等脆性岩石的 Kaiser 效应几乎没有影响。对于砂岩、泥岩等岩石, 随着加载速率的增加, Kaiser 点对应的应力值增大, 应该选取合适的加载速率进行 Kaiser 效应试验。由于塑性岩石的力学特性比较特殊, 例如, 盐岩、黏土等, 它们的 Kaiser 效应受时间的影响就比较明显, 对塑性岩石的加载速率对 Kaiser 效应的影响应进行更加深入的研究。

(2) 加载速率较小时, 较小的裂缝也会发生错动和扩展, 对应得到的 Kaiser 效应点的应力值较小; 而当加载速率较大时, 只有较大的裂缝才会发生错动和扩展, 得到的 Kaiser 效应的应力值相对较大, 增加幅度为 5%~15%。

(3) 加载速率的大小对弹性模量等岩石力学参数也有一定的影响, 所以在进行其他试验测定时, 建议进行具体分析, 得到更准确的试验结果。

(4) 针对加载速率对 Kaiser 效应的影响, 在实际应用中, 由于实验室的加载速率远远高于实际地层中历史活动的加载速率, 所以实验室测量 Kaiser 效应所得到地应力值与实际情况会有所差异, 加载速率对 Kaiser 效应具有重要影响。

参考文献(References):

- [1] PANASIYAN L L, KOLEGOV S A, MORGUNOV A N. Stress memory studies in rocks by means of acoustic emission[C]// Proceedings of the International Conference Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990: 435 - 439.
- [2] KURITA K, FUJII N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission[J]. Geophysical Research, 1979, 6(1): 9 - 12.
- [3] KANAGAWA T, NAKASA H. Method of estimating ground pressure[P]4107981. 1978.
- [4] SUGAWARA K, OBARA Y. Evaluation of initial rock stress by the

表 2 Kaiser 效应法和水力压裂法结果比较

Table 2 Correlation between calculation results of Kaiser effect and hydraulic fracturing tests

井号	井深 /m	最大水平地应力/MPa		最小水平地应力/MPa	
		Kaiser效应法	水力压裂法	Kaiser效应法	水力压裂法
G19 - 10	2 457	1.901	1.967	1.520	1.588
L19X1	3 214	2.120	2.165	1.654	1.687
MRX1	2 963	2.190	2.200	1.700	1.710
NP1	2 654	1.910	1.900	1.490	1.510

- orthotropic spherical shell model[C]// Rock Stress Proceedings of the International Symposium on Rock's Stress, Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 905 - 912.
- [5] YU X F, GE S G, YU J, et al Rock memory and intelligent computing of the excavation process in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 549 - 554.
- [6] YAMSHCHIKOV V S, SHKURATNIK V L, LAVROV A V. Memory effects in rocks(review)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(4/5): 153 - 154.
- [7] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. The Geological Society of American Bulletin, 1963, 74(4): 487 - 90.
- [8] YOSHIKAWA S, MOGI K. Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity—a possibility for estimation of rock stress[J]. Journal of Acoustic Emission, 1989, 8(4): 113 - 123.
- [9] KOERNER R M, LORD A E. AE detection of prestress in soil and rock[C]// Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 73 - 86.
- [10] 张广清, 金 衍, 陈 勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360 - 363.(ZHANG Guangqing, JIN Yan, CHEN Mian. Measurement of in-situ stress by Kaiser effect under confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 360 - 363.(in Chinese))
- [11] LAVROV A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(11): 669 - 677.
- [12] MICHIIHIRO K, YOSHIOKA H, HATA K, et al. Strain dependence of the Kaiser effect for various rocks[C]// Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 87 - 95.
- [13] LI Y, SCHMITT D R. Effects of Poisson's ratio and core stub length on bottom hole stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, 34(5): 761 - 773
- [14] CHANG C D, MARK D Z, ABBAS K. Empirical relation between rock strength and physical properties in sedimentary rocks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 51(3/4): 223 - 237.
- [15] 张 流, 薛丽霞. 高围压下岩石破坏和摩擦滑动过程中的声发射活动性[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1): 38 - 47.(ZHANG Liu, XUE Lixia. Acoustic emission characteristics of rock failure and intra friction under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(1): 38 - 47.(in Chinese))
- [16] SETO M, UTAGAWA M, KATSUYAMA K. The relation between the variation of AE hypocenters and the Kaiser effect of Shirahama sandstone[C]// Proceedings of the 8th Int. Cong. on Rock Mechanics, Tokyo: [s. n.], 1995: 201 - 205.
- [17] SETO M, NAG D K, VUTUKURI V S. Experimental verification of the Kaiser effect in rock under different environment conditions[C]// Proc. for Eurock'96. Torino: [s. n.], 1996: 1 - 8.
- [18] 张 茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(in Chinese))
- [19] UTAGAWA M, SETO M, KATSUYAMA K. Application of acoustic emission technique to determination of in-situ stresses in mines[C]// Proceedings of the 26th Int. Conf. Safety in Mines Research Institute. Katowice: Central Mining Institute, 1995: 95 - 109.